

Computer-Simulation des Wettbewerbs zwischen Sprachen

D. Stauffer¹, C. Schulze¹, S. Wichmann²

¹ Theoretische Physik, Universität, D-50923 Köln, Euroland

² Abteilung für Linguistik, Max Planck Institut für Evolutionäre Anthropologie
Deutscher Platz 6, D-04103 Leipzig, Germany

Zusammenfassung

Recent computer simulations of the competition between thousands of languages are reviewed, and some new results on language families and language similarities are presented.

1. Einleitung

Bereits im Jahre 2006 hat Kölner Universität die Integration der passenden Didaktiken in die Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät vollzogen, was im Saarland zu der Zeit eingeleitet wurde, als DS dort war (1974-77, Gruppe Binder). Deshalb und weil DS auch jahrzehntelang die Lehramtskommission der Kölner Fachgruppe Physik leitete und das Lehramtsstudium gegen die diversen Vorgaben von oben verteidigte, sind wir jetzt berechtigt, Herrn Patt zum 70. Geburtstag zu ehren.

Theoretische Physik ist heute auch nicht mehr das, was sie früher einmal war. Auf dem Computer sind bis zu 10^{13} Teilchen simuliert werden, und so können komplexe System simuliert werden, wo das Verhalten des Gesamtsystems nicht direkt aus dem Verhalten der einzelnen Teilchen erschlossen werden kann. Ein Beispiel dafür sind reale Gase, die seit 1872 durch die Gleichung von van der Waals approximiert werden. Aus der Tatsache, dass sich die Teilchen teilweise anziehen und teilweise abstoßen, kann man nicht direkt erkennen, dass es ein Gleichgewicht von Dampf und Flüssigkeit und eine kritische Temperatur gibt. Auch der Unterschied von Massenpsychologie zur Psychologie der Einzelnen kann als Komplexität gelten.

So haben in den letzten Jahren die Physiker auf ihren Computern nicht nur Biologie simuliert (Biologie ist eine alte Liebe der Physik, die erst seit kurzem erwidert wird), sondern auch Börsenkurse, Meinungsbildung, soziale Netzwerke, ... [1]. Seit 2004 hat diese Seuche auch die Sprachwissenschaft erreicht [2], und umgekehrt benutzen Linguisten auch Methoden aus der Physik komplexer Systeme [3]. Diese Arbeiten [2] führten kurz danach an sechs verschiedenen Unis unabhängig von einander zu weiteren Simulationen des Wettbewerbs zwischen Sprachen. Über diese Computersimulation der Wechselwirkung zwischen verschiedenen Sprachen wird hier berichtet; eine ausführlichere aber schon veraltende Übersicht ist [4]. Wir benutzen die seit einem halben Jahrhundert in der Physik vorhandenen Methoden der Simulation einzelner Teilchen, ohne dass wir näherungsweise über viele Teilchen mitteln;

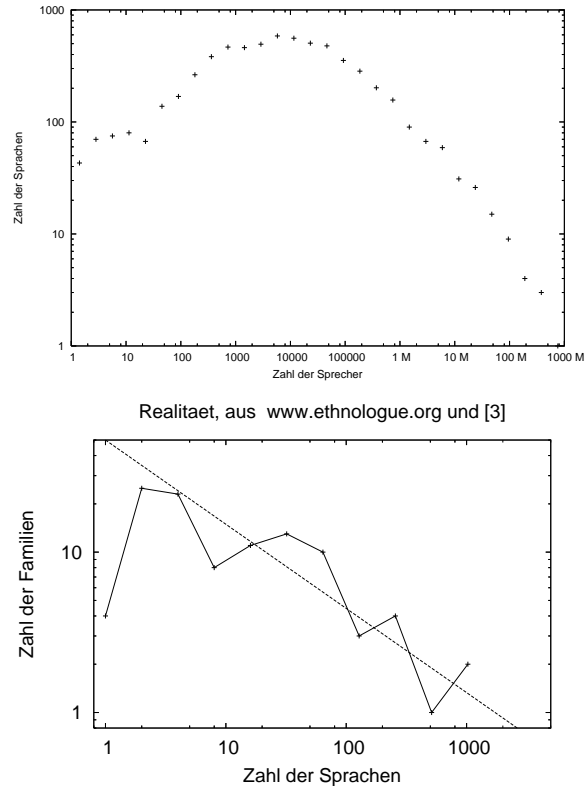


Abbildung 1: Empirische Verteilung der realen Sprachgrößen [4] (oben) und Familiengrößen [3] (unten).

in anderen Wissenschaften ist diese Methode neuer und wird oft “Agenten-basiert” genannt [5]. Übrigens hat Selten, Wirtschaftsnobelpreisträger in Bonn, schon viel früher Spieltheorie auf Sprachen angewandt [6].

Heute sprechen die Menschen etwa 7000 Sprachen, davon alleine etwa 800 in Papua-Neuguinea. Alle zehn Tage stirbt im Durchschnitt eine Sprache aus. Werden in einigen Jahrtausenden alle Menschen die gleiche Sprache (und ihre Varianten) sprechen [7]? Können wir die reale Verteilung der Sprachgrößen in einer Simulation reproduzieren: Wieviel Sprachen gibt es, die jeweils N Leute als Muttersprache haben? Diese reale Verteilung in Abb.1a ist eine Log-Normal-Verteilung mit einer Erhöhung bei den ganz kleinen Sprachen, die nur noch von ein paar Leuten gesprochen werden. Eine Parabel in dieser doppelt-logarithmischen Abbildung entspricht einer lognormalen Verteilung. Mandarin-Chinesisch wird von mehr als einer Mil-

liarde gesprochen, und etwa 50 Sprachen nur noch von einer Person.

Im nächsten Abschnitt werden die beiden Modelle erklärt, mit denen wir 7000 Sprachen gleichzeitig simulieren können, und im übernächsten Abschnitt bringen wir ausgewählte Resultate. Überall zählt die Größe einer Sprache die Zahl der Sprecher dieser Sprache. Ein Anhang listet eines der benutzten Fortran-Programme.

2. Vielsprach-Modelle

2.1 Schulze-Modell

Dieses erste Modell für viele Sprachen gibt es in diversen Versionen, deren Resultate meist ähnlich sind; hier wird die letzte Version erklärt. Auf jedem Gitterpunkt eines $L \times L$ Quadratgitters lebt ein Mensch, der genau eine Sprache spricht. Diese Sprache wird definiert durch F Eigenschaften, von denen jede durch eine ganze Zahl zwischen 1 und Q charakterisiert ist. Beispiele sind grammatische Eigenschaften wie die Reihenfolge von Subjekt, Objekt und Verb. Typische Werte sind $Q = 2$ bis 5, $F = 8$ oder 16. Bei $Q = 2$ kann man effizienter rechnen, wenn $F = 8, 16, 32$ oder 64 Eigenschaften dann in einem einzigen Computerwort (Bitstring) als Bits abgespeichert werden. Bei einer Iteration wird jeder Gitterpunkt einmal behandelt.

Mit Wahrscheinlichkeit p , unabhängig für jede der F Eigenschaften, ändert sich die betrachtete Eigenschaft der am betrachteten Gitterpunkt gesprochen Sprache. Diese Wahrscheinlichkeit p ist in der Realität etwa ein Prozent pro menschlicher Generation. Außerdem springt mit Wahrscheinlichkeit $1 - x^2$ oder $(1 - x)^2$ jemand von einer Sprache, die von einem Bruchteil x der Gesamtbevölkerung gesprochen wird, zur Sprache einer zufällig ausgewählten (benachbarten) Person. Letzterer Prozess ist eine typisch menschliche Eigenschaft, dass man von einer “kleinen” zu einer weit verbreiteten Sprache springt, wie es in der Physikforschung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts geschah.

Darüber hinaus können auch (mit Wahrscheinlichkeit q) Eigenschaften von einem zufällig ausgewählten Nachbarn übernommen werden. Beispiele für diese linguistische Diffusion sind französische Lehnworte oder englische Grammatik im Deutschen: “Ich ging in 2005 zweimal zum Friseur”. Und obiger Sprung von einer zur anderen Sprache wird nur mit Wahrscheinlichkeit r bedacht, also insgesamt mit Wahrscheinlichkeit $(1 - x)^2 r$ gemacht. In Abschnitt 3.1 werden wir noch Löcher ins Schulze-Modell bohren oder es auf ein Barabási-Albert Netzwerk setzen.

2.2 Viviane Model

Die Kolonisierung eines zunächst menschenleeren Kontinents wurde von Viviane de Oliveira et al modelliert [8] und wird hier brasilianischem Stil entsprechend mit dem Namen Viviane bezeichnet. Zunächst beschreiben wir die ursprüngliche Version

[8], dann eine bessere Modifikation in zwei Varianten a und b [9].

2.2.1 Ursprüngliche Version

Auf jedem Gitterpunkt j eines $L \times L$ Quadratgitters leben entweder c_j Menschen, oder niemand, mit $1 \leq c_j \leq m$ zufällig gewählt, und $m \sim 10^2$. Auf einem bewohnten Gitterplatz wird nur eine Sprache gesprochen. Anfangs ist nur ein Gitterpunkt bewohnt, so wie Amerika wohl von der Beringstraße aus besiedelt wurde. Danach breitet sich die Bevölkerung aus, Schritt für Schritt in einen freien Nachbarn bewohnter Plätze; dieser wird mit einer Wahrscheinlichkeit c_j/m ausgewählt. Dort wird erst die Sprache k eines der bewohnten Nachbarplätze gesprochen, der mit einer Wahrscheinlichkeit proportional zur Sprachgröße N_k ("Fitness") ausgewählt wird. Anschließend ändert sich mit einer Wahrscheinlichkeit α/N'_k die Sprache am neu besiedelten Platz, so dass dort eine neue entsteht, wobei N'_k die kleinere der beiden Zahlen N_k und M_k ist, und die Grenze M_k anfangs zufällig zwischen 1 und $M_{\max} \sim 20m$ festgelegt wird. (In anderen Worten: Die Mutationsrate ist umgekehrt proportional zur Sprachgröße, mindestens aber eine von der Sprachgröße unabhängige und zufällig am Anfang festgelegte Wahrscheinlichkeit α/M_k .) Der Mutationsfaktor α ist ein freier Parameter. Die neue Sprache bekommt eine neue Nummer; andere mehr inhaltliche Sprachelemente hat das ursprüngliche Modell nicht. Die Sprachen auf den bereits besetzten Plätzen ändern sich nicht mehr. Die Simulation endet, wenn alle Gitterplätze besetzt sind.

2.2.2 Modifizierte Versionen

Obiges Viviane-Modell wird beibehalten bis auf folgende zwei Fälle von Modifikationen, die zu zwei Versionen führen und auf Paulo Murilo de Oliveira [9] zurückgehen:

a) Zunächst kann jeder Sprache des Viviane-Modells ein Bitstring zugeordnet werden, also eine Kette von 8 bis 64 binären Variablen in den bisherigen Simulationen (siehe Programm im Anhang). Diese Bits geben der Sprache einen Inhalt und erlauben, die Unterschiedlichkeit verschiedener Sprachen zu bestimmen (siehe Abschnitt 3.2). Wie zuvor führt jede Mutation bei der Besiedlung eines neuen Platzes zu einer neuen Sprache.

b) Stattdessen kann auch eine Sprache nur dann als neu definiert werden, wenn der Bitstring sich ändert und eine bisher nicht aufgetretene Folge von Bits darstellt. Die Zahl der verschiedenen Sprachen ist dann die Zahl der verschiedenen Bitstrings. Die Änderung einer Sprache kann damit auch zu einer bereits vorhandenen Sprache führen, etwa wenn das erste Bit von 01011000 von Null auf Eins springt und der Bitstring 11011000 schon auf einem anderen Gitterplatz mit einer anderen Vorges-

chichte realisiert ist. Außerdem wird berücksichtigt, dass die meisten Gegenden der Erde weniger attraktiv sind als die großen Metropolen; die Bevölkerungsdichte c zwischen 1 und m wird nicht gleichförmig bestimmt, sondern mit einer Wahrscheinlichkeit proportional zu $1/c$, analog zu realen Größenverteilung von Städten. Dann ist es effizienter, die Auswahl eines unbewohnten Nachbarplatzes proportional zu seiner Attraktivität c dadurch zu realisieren, dass zwei solche unbewohnte Nachbarn zufällig ausgewählt werden, und der mit dem größeren c anschließend besiedelt wird.

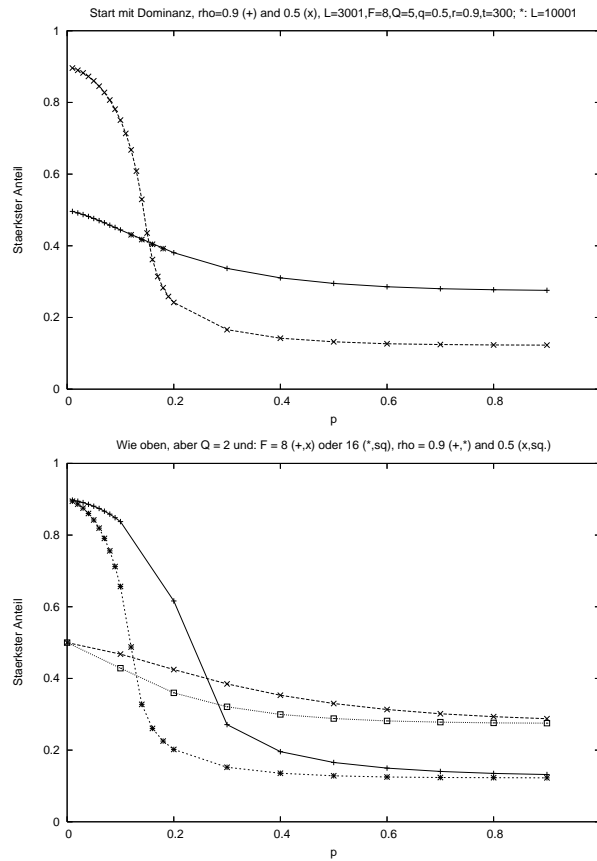


Abbildung 2: Anteil der am Ende größten Sprache an der Gesamtbevölkerung im löchrigen Schulze-Modell.

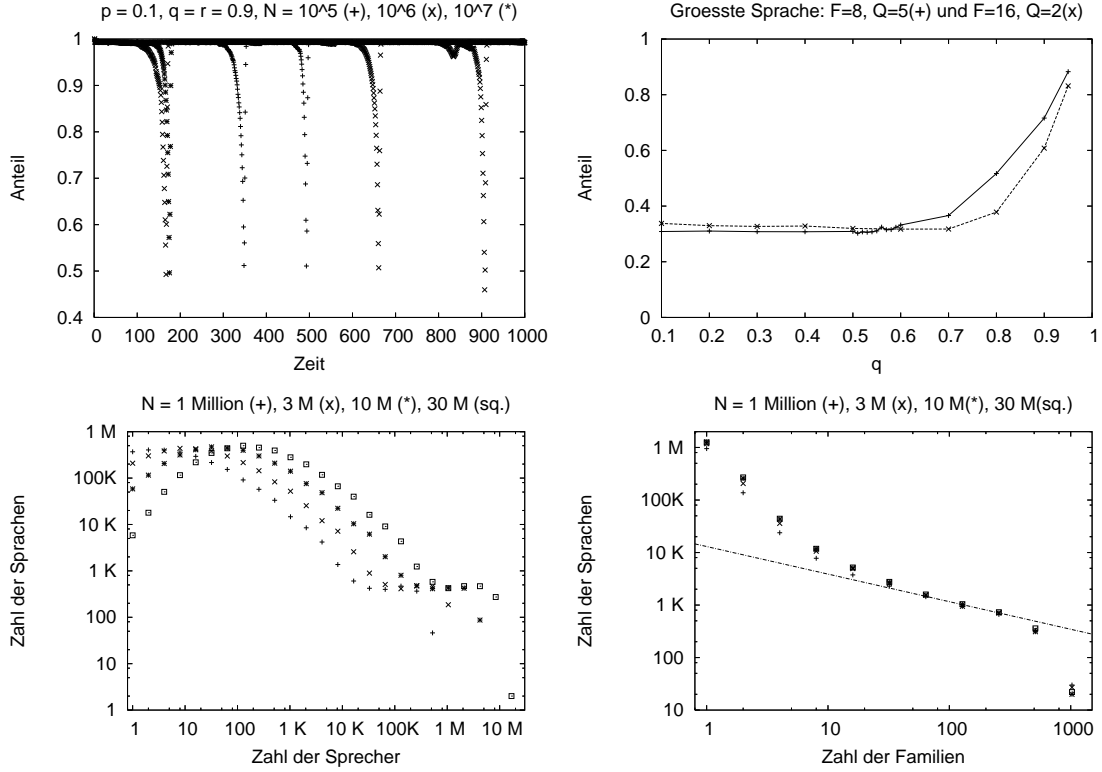


Abbildung 3: $F = 8$, $Q = 5$, 10 Millionen Leute: Anteil der größten Sprache an der Gesamtbevölkerung (oben) und Größenverteilung (unten), im Schulze-Modell auf gerichtetem Barabási-Albert Netzwerk. Rechts und unten: $p = 0.5$, $q = 0.59$, $r = 0.9$; Steigung $-0,525$.

3. Resultate

3.1 Schulze-Modell

Wenn anfangs Alle die gleiche Sprache sprechen, dann kann eine hinreichend hohe Änderungswahrscheinlichkeit p zu einer Fragmentation führen wie beim Turmbau zu Babel: Die Bevölkerung verteilt sich etwa gleichmäßig auf die Q^F möglichen Sprachen. Man kann aber auch mit so einer fragmentierten Bevölkerung beginnen und dann bei hinreichend kleinem p sehen, wie nach einiger Zeit eine Sprache dominiert und von den meisten Leuten gesprochen wird; die Anderen sprechen meist eine Variante dieser dominierenden Sprache. Wir sehen einen Phasenübergang erster Art, mit Hysterese. Nur im Nichtgleichgewicht und mit zusätzlichen Rausch-Effekten

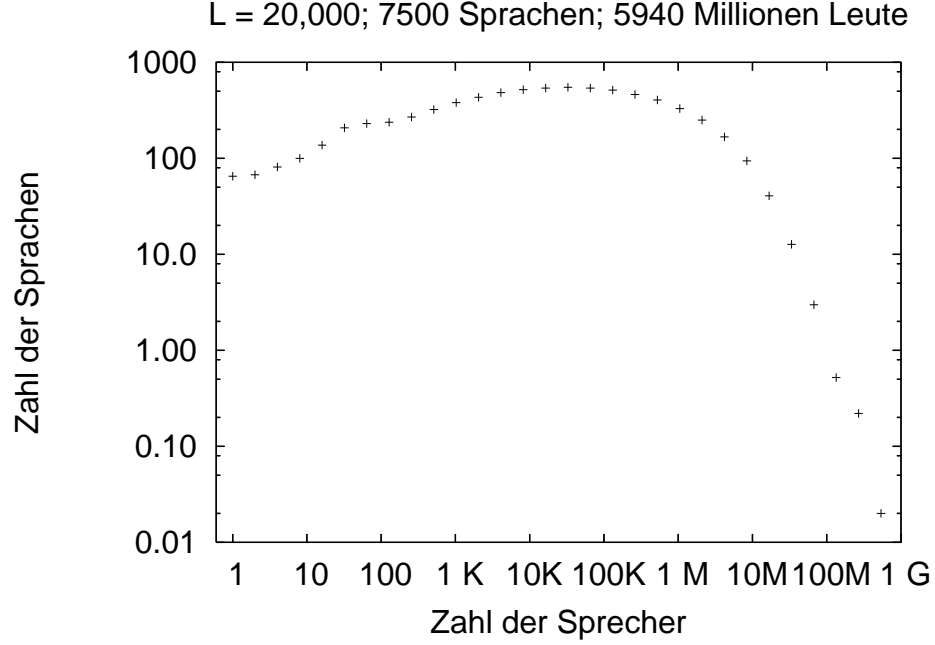


Abbildung 4: Größenverteilung der Sprachen im modifizierten Viviane-Modell, Fall b, 13 Bits pro Bitstring, $\alpha = 0.1$, $m = 63$, $M_{\max} = 255$.

[10] konnte eine Größenverteilung ähnlich zu Abb.1 simuliert werden.

Dinge wurden nicht besser, wenn Dreikörper- und Fünfkörper-Kräfte angenommen wurden: Eine Eigenschaft wurde von einer anderen Sprache übernommen nur, wenn zwei, oder alle vier, Nachbarn die gleiche Eigenschaft hatten.

Ganz anders ist die Situation in der löchrigen Version, wenn nur ein zufälliger Anteil ρ aller Plätze bewohnbar ist. “Bekanntlich” bilden sich dann auf dem Quadratgitter bei $\rho < 0,593$ nur endliche Cluster bewohnbarer Nachbarn, während bei $\rho > 0,593$ auch ein unendliches Cluster sich von einem Ende des Gitters zum anderen erstreckt. Abb.2 zeigt nun mit wachsendem p einen kontinuierlichen Abfall des Anteils der (gegen Ende der Simulation von t Iterationen) größten Sprache, ähnlich zum Viviane-Modell: Die Unordnung hat den Phasenübergang zerstört. Die Größenverteilung der Sprachen stimmt aber immer noch nicht.

Besser wird das Schulze-Modell, wenn statt auf zufällig besetzten Plätzen die Sprecher auf “scale-free” Netzen vom Barabási-Albert Typ sitzen [11]. Dabei geht man von drei miteinander verbundenen Netzwerk-Gründern aus, und addiert danach

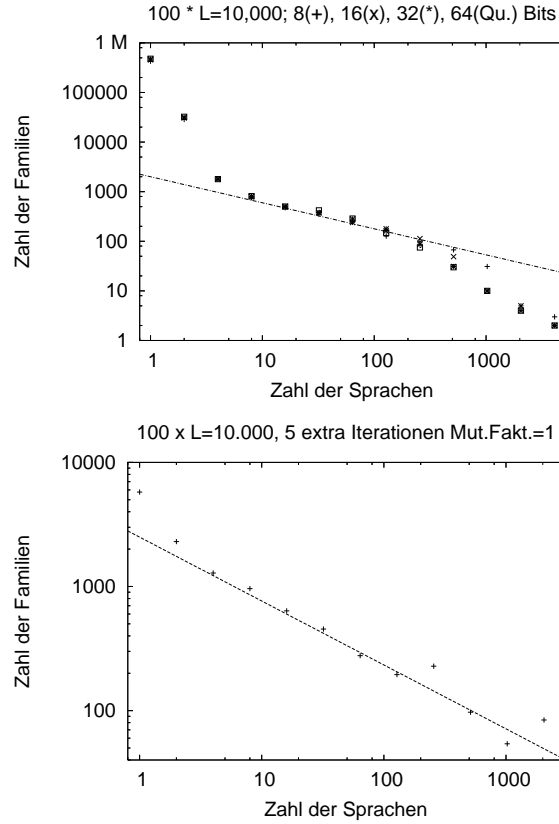


Abbildung 5: Einteilung der Sprachen in Sprachfamilien im modifizierten Viviane-Modell, Summe über 100 Gitter, zu vergleichen mit Abb. 1b. Oben: Fall a, $\alpha = 0.05$, $m = 127$, $M_{\max} = 255$. Unten: Fall b, $\alpha = 0.10$, $m = 63$, $M_{\max} = 255$.

neue Mitglieder, eines nach dem anderen. Ein neues Mitglied sucht sich aus den zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Mitgliedern drei Vorgesetzte aus, proportional zur Zahl der Mitglieder, die vorher diese Person als Vorgesetzte gewählt haben.

Abb.3a zeigt jetzt statt einer dominierenden Sprache einen Wechsel von einer zu einer anderen dominierenden Sprache; während des Wechsels sinkt der Anteil der größten Sprache in einem kleinen Zeitintervall auf etwa $1/2$; dann wird eine andere Sprache dominierend, und ihr Anteil springt wieder auf nahezu 1 hoch. Dies passiert etwa zweimal im betrachteten Zeitintervall $t = 1000$, für jede der drei gezeigten Netzgrößen in etwa gleicher Weise. In der Biologie nennt man das “punctuated equilibrium”. Wenn p anwächst, ergeben sich brauchbare Größenverteilungen

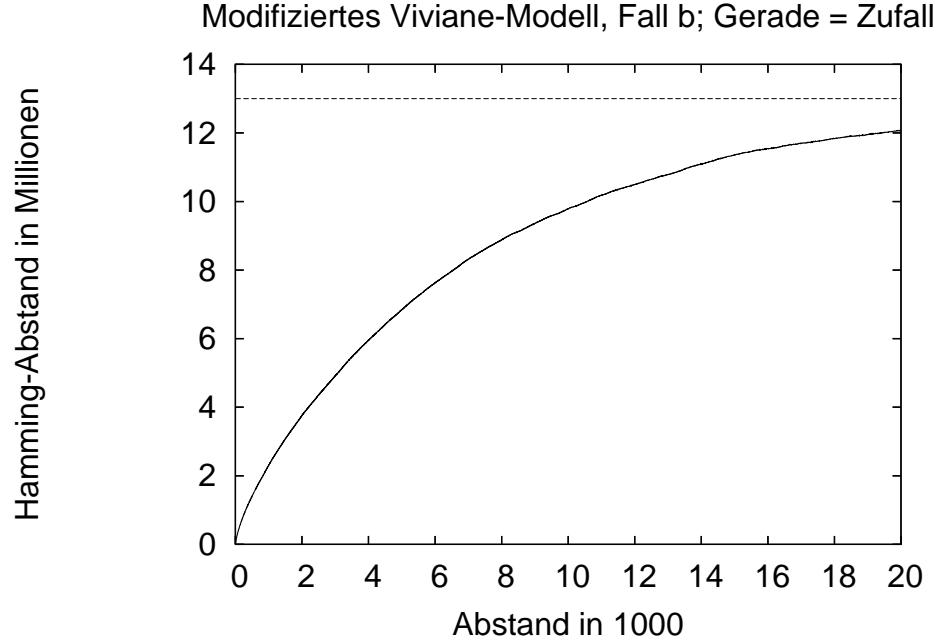


Abbildung 6: Unähnlichkeit zwischen Sprachen als Funktion des geographischen Abstands. Die Einheit der horizontalen Achse sind 1000 Gitterkonstanten. Die horizontale Gerade zeigt den summierten Hammingabstand an, wenn die Sprachen völlig unkorreliert wären. 13 Bits, $\alpha = 0.1$, $m = 63$, $M_{\max} = 255$, $L = 20.000$.

wie in Abb. 3c. (In Abb. 3 wird, wie am Ende von 2.1 erwähnt, mit Wahrscheinlichkeit q eine Sprach-Eigenschaft von einem Vorgesetzten übernommen, und der Sprung zu einer Sprache eines zufällig ausgewählten Vorgesetzten geschieht mit Wahrscheinlichkeit $r(1 - x)^2$.) Auch jetzt ist kein Phasenübergang mehr da. Die Größenverteilungen für die Sprachen (als Funktion der Zahl der Sprecher) und für die Zahl der Familien (als Funktion der Zahl der Sprachen) sind recht gut, Abb.3 unten.

3.2 Viviane-Modell

Im ursprünglichen Viviane-Modell stimmt die Größenverteilung besser und erstreckt sich in großen Gittern von 1 bis zu einer Milliarde. Nur gibt die doppelt-logarithmische Darstellung keine Parabel, sondern zwei Geraden, die zwei Potenzgesetzen entsprechen. Nur wenn wieder Rauschen [10] eingebaut wird, sieht die Verteilung ordentlich aus [9].

Viel besser funktioniert die von Paulo Murilo de Oliveira (nicht mit Viviane de Oliveira verwandt) modifizierte Version (Fall b in Abschnitt 2.2.2). Abb.4 aus [9] zeigt eine leicht schiefe Parabel, ähnlich zu Abb.1, mit 6 Milliarden Menschen und 7500 Sprachen.

Die Einteilung der Sprachen in Familien (z.B. die indogermanische Sprachfamilie) funktioniert in beiden Fällen a und b. Eine neue Sprachfamilie startet genau dann, wenn eine gerade mutierte Sprache sich um mindestens i Bits von der historisch ersten Sprache dieser Sprachfamilie unterscheidet. Bei $i = 1$ bildet jede neue Sprache eine neue Sprachfamilie: uninteressant. Von $i = 2, 3$ und 4 funktioniert $i = 2$ am besten, und Abb. 5 zeigt oben $i = 2$ mit Bitstrings der Länge 8, 16, 32 und 64: Kein Einfluss der Zahl der Bits. Die Gerade hat die Steigung $-0,525$, die dem empirischen Exponenten von $-1,905 = -1/0,525$ der Realität nach [3] entspricht. Der untere Teil zeigt Fall b mit 13 Bits, wobei zu fünf Zeiten im gleichen Abstand auch die längst besetzten Plätze ihr Sprache ändern können, wie es dauernd bei den neu besetzten Plätzen geschieht.

Auch die Geographie spielt eine Rolle, und je weiter die Sprachen räumlich voneinander getrennt sind, um so mehr unterscheiden sie sich im Durchschnitt. Holman und Wichmann haben das für die Realität untersucht [12], und eine ganz ähnliche Kurve liefert Fall b des modifizierten Viviane-Modells in Abb. 6. Hier wird der Unterschied zwischen den Sprachen durch den Hamming-Abstand zwischen den Bitstrings gemessen, also durch die Zahl der verschiedenen Bits bei einem Position-für-Position Vergleich der beiden Bitstrings. Wenn die Sprachen gar nicht mehr korreliert wären, würden sie in der Hälfte der Bits übereinstimmen, was durch die Gerade in Abb. 6 symbolisiert wird. Ähnlich zur Realität [12] sind die Sprachen erst dann nahezu unkorreliert, wenn wir von einem Ende des 20.000×20.000 Gitters zum anderen gehen.

4. Diskussion

Nach vielen Anläufen sind im letzten Jahr sind erhebliche Fortschritte dabei gemacht worden, die quantitative Übereinstimmung von Simulation und Realität zu verbessern. Die Zahl der Sprachen als Funktion der Zahl der Sprecher stimmt gut, Abb. 1 und 4, die der Zahl der Sprachfamilien als Funktion der Zahl der Sprachen in Abb. 1 und 5 stimmt einigermaßen. Abb. 6 suggeriert, dass eine Gittereinheit knapp einem Kilometer entspricht, was auch mit der Bevölkerungsdichte $1 \leq c_j \leq m \sim 10^2$ zusammenpasst. Man sollte nach alternativen Modellen suchen, die Ähnliches leisten; derzeit ist das Schulze-Modell gegenüber dem Viviane-Modell leicht zurückgeblieben.

5. Anhang

Das folgende Fortran-Programm addiert zum ursprünglichen Viviane Modell nur die Bitstrings des modifizierten Viviane-Modells und zählt neben den Sprachen `nlang` auch die Sprachfamilien `ifam`. In den zwei Zeilen vor dem ersten Print-Befehl muss nach `integer*` bzw. `data Lg/` die gleiche Zahl 8, 4, 2 oder 1 untereinander angegeben werden für 64, 32, 16 oder 8 Bits pro Bitstring. Zum Schluss wird ausgedruckt die Zahl `ns` der Sprachen einer bestimmten Größe, die Zahl `nf` der Sprachfamilien (mit Größe = Zahl der Sprachen in der Familie) und das Histogramm `nhist` der Zahl der 1-Bits. Die ersten beiden Größen werden in Zweierpotenzen zusammengefasst, also z.B. von 32 bis 63. Weitere Fragen beantwortet bis Anfang 2008 stauffer@thp.uni-koeln.de.

```

        parameter(L=10000,L2=L*L,L0=1-L,L3=L2+L,L4=25*L+1000,L5=32767,
1          iscale= 7, imax=11)
c    language colonization of de Oliveira, Gomes and Tsang, Physica A
c    add bitstring to each language; with Hamming family analysis
c    ifam(lang) gives the family to which language "lang" belongs
c    nlang(ifam) gives the number of languages within one family
c    grammar bitstring has Lg bytes = 8*Lg bits, integer*Lg grammar
integer*8 ibm,mult,icount(L5),jpower,numpop,nhist(0:64)
integer*2 lang,limit,mother(L5),nlang(0:L5)
byte isite, c
c    byte isite
c    integer*2 c
dimension neighb(0:3),isite(L0:L3),list(L4),lang(L2),c(L2),f(L5),
1 nf(0:40),ns(0:40),limit(L5),grammar(0:L5),popct(0:255),ifam(L5)
integer*8 grammar,grammd,bit(0:63)
data Lg/8/,iseed/2/,alpha/0.05 /,ns/41*0/,nf/41*0/,nrun/100/
print *, '# ', L, iseed, alpha, nrun, Lg, iscale, imax, ' >=2'
c    if(iscale.gt.7.or.imax.gt.15) stop 6
    if(Lg.eq.8) kshift=-58
    if(Lg.eq.4) kshift=-59
    if(Lg.eq.2) kshift=-60
    if(Lg.eq.1) kshift=-61
    bit(0)=1
    do 25 i=1,63
25    bit(i)=ishft(bit(i-1),1)
        mult=13**7
        mult=mult*13**6
        ibm=(2*iseed-1)*mult
        ibm=ibm*16807

```

```

factor=(0.25d0/2147483648.0d0)/2147483648.0d0
fac=1.0/2.0**iscale
do 17 j=0,255
    ici=0
    do 18 i=0,7
18        ici=ici+iand(1,ishft(j,-i))
17    popct(j)=ici
    neighb(0)= 1
    neighb(1)=-1
    neighb(2)= L
    neighb(3)=-L
    do 11 irun=1,nrun
    call flush(6)
    do 22 ici=0,64
22        nhist(ici)=0
    numpop=0
    do 10 j=2,L5
        nlang(j)=0
        ifam(j)=0
        mother(j)=0
        icount(j)=0
        ibm=ibm*mult
        limit(j)=1+ishft(ibm,imax-64)
10    f(j)=0.0
    do 6 j=L0,L3
        if(j.le.0.or.j.gt.L2) goto 6
        lang(j)=0
9        ibm=ibm*16807
        c(j)=ishft(ibm,iscale-64)
        if(c(j).eq.0) goto 9
        numpop=numpop+c(j)
6        isite(j)=0
c    print *, limit, ' limit, c ', c
    j=L2/2+1
    isite(j)=1
    isite(j+1)=2
    isite(j-1)=2
    isite(j+L)=2
    isite(j-L)=2
    list(1)=j+1

```

```

list(2)=j-1
list(3)=j+L
list(4)=j-L
isurf=4
nempty=L2-5
number=1
mother(1)=1
lang(j)=1
ifam(1)=1
ifamj=1
nfam=1
nlang(nfam)=1
nlang(0)=0
grammar(number)=0
icount(1)=1
f(1)=c(j)*fac
c   surface=2, occupied=1, empty=0
c   end of initialisation, start of growth
do 1 itime=1,2000000000
13   ibm=ibm*16807
      index=1.0+(0.5+factor*ibm)*isurf
      if(index.gt.isurf.or.index.le.0) goto 13
      j=list(index)
c   if(itime.eq.(itime/500000 )*500000 )
c   1   print*,itime,number,isurf,nfam
      ibm=ibm*mult
      if(0.5+factor*ibm .ge. c(j)*fac) goto 1
      list(index)=list(isurf)
      isurf=isurf-1
      isite(j)=1
c   now select language from random neighbour; prob. propto fitness
      fsum=0
      do 5 idir=0,3
5     if(isite(j+neighb(idir)).eq.1) fsum=fsum+f(lang(j+neighb(idir)))
3     ibm=ibm*16807
      idir=ishft(ibm,-62)
      i=j+neighb(idir)
      if(isite(i).ne.1) goto 3
      ibm=ibm*mult
      if(0.5+factor*ibm .ge. f(lang(i))/fsum) goto 3

```

```

lang(j)=lang(i)
ifam(lang(j))=ifam(lang(i))
grammar(lang(j))=grammar(lang(i))
f(lang(j))=min(limit(lang(j)), f(lang(j)) + c(j)*fac)
c now come mutations inversely proportional to fitness f
ibm=ibm*16807
if(0.5+factor*ibm .lt. alpha/f(lang(j)) ) then
    number=number+1
    ifamj=ifam(lang(j))
    nlang(ifamj)=nlang(ifamj)+1
    ifam(number)=ifamj
    if(number.gt.L5) stop 8
    ibm=ibm*mult
    nbit=ishft(ibm,kshift)
    grammar(number)=ieor(grammar(lang(j)),bit(nbit))
    lang(j)=number
    f(lang(j))= c(j)*fac
    mother(number)=mother(lang(i))
end if
icount(lang(j))=icount(lang(j)) + c(j)
c now determine Hamming distance (grammd) to previous ancestor
grammd=ieor(grammar(lang(j)),grammar(mother(lang(i))))
ici=0
do 23 ibyte=0,Lg-1
23    ici=ici+popct(iand(255,ishft(grammd,-8*ibyte)))
if(ici.ge.2) then
c    new family starts here; subtract previously added language
    mother(lang(j))=lang(j)
    nlang(ifamj)=nlang(ifamj)-1
    nfam=nfam+1
    ifam(lang(j))=nfam
    if(nfam.ge.L5) stop 7
    nlang(nfam)=1
end if
if(isurf.eq.0) goto 8
c now determine new surface sites as usual in Eden model
do 2 idir=0,3
    i=j+neighb(idir)
    if(i.le.0.or.i.gt.L2) goto 2
    if(isite(i).ge.1) goto 2

```

```

        isurf=isurf+1
        if(isurf.gt.L4) stop 9
        nempty=nempty-1
        list(isurf)=i
        isite(i)=2
2      continue
1      continue
8      continue
        if(L.eq.79) print 7, lang
7      format(1x,79i1)
        print *, irun, number, itime, numpop, nfam
        do 11 k=1,number
            if(icount(k).gt.0) j=alog(float(icount(k)))/0.69314
            if(k.gt.0.and.k.le.nfam.and.nlang(k).gt.0) then
                i=alog(float(nlang(k)))/0.69314
                nf(i)=nf(i)+1
            end if
11         ns(j)=ns(j)+1
            jpower=1
            do 12 j=0,37
                if(j.gt.0) jpower=jpower*2
12         if(ns(j).gt.0) print *, jpower,ns(j),nf(j)
            do 19 j=1,number
                grammd=grammar(j)
                ici=0
                do 20 ibyte=0,Lg-1
20                 ici=ici+popct(iand(255,ishft(grammd,-8*ibyte)))
19                 nhist(ici)=nhist(ici)+1
            do 21 ici=0,64
21         if(nhist(ici).gt.0) print *, ici, nhist(ici)
        if(nrun.gt.1) stop
        langsum=0
        do 24 i=1,number
            langsum=langsum+nlang(i)
24         if(nlang(i)+ifam(i).ne.0) print *, i, nlang(i),ifam(i)
        print *, langsum
        stop
        end

```

Literatur

- [1] D. Stauffer, S. Moss de Oliveira, P.M.C. de Oliveira, J.S. Sá Martins, *Biology, Sociology, Geology by Computational Physicists*. Amsterdam: Elsevier 2006.
- [2] D. Abrams and S.H. Strogatz, *Nature* 424, 900 (2003); M. Patriarca and T. Leppänen, *Physica A* 338, 296 (2004).
- [3] S. Wichmann, *J. Linguistics* 41, 117 (2005).
- [4] C. Schulze and D. Stauffer, S.311 in: B.K. Chakrabarti, A. Chakraborti, and A. Chatterjee (Hgg.), *Econophysics and Sociophysics: Trends and Perspectives*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag 2006.
- [5] F.C. Billari, T. Fent, A. Prskawetz and J. Scheffran (Hgg.) *Agent-based computational modelling*, Heidelberg: Physica-Verlag 2006.
- [6] R. Selten und J. Pool, S.64 in: R. Selten (Hg), *Game Equilibrium Models IV*, Berlin-Heidelberg: Springer 1992.
- [7] P. van Parijs, *Int. Polit. Sci. Rev.* 21, 217 (2000).
- [8] V.M. de Oliveira, M.A.F. Gomes and I.R. Tsang, *Physica A* 361, 361 und 368, 257 (2006).
- [9] P.M.C. de Oliveira, D. Stauffer, F.W.S. Lima, A.O. Sousa, C. Schulze and S. Moss de Oliveira, *Physica A*, in press (2007).
- [10] D. Stauffer, C. Schulze, F.W.S. Lima, S. Wichmann and S. Solomon, *Physica A* 371, 719 (2006).
- [11] R. Albert and L.A. Barabási, *Rev. Mod. Phys.* 74, 47 (2002).
- [12] E.W. Holman, C. Schulze, D. Stauffer und S. Wichmann, eingeschickt an Linguistic Typology.